



Tiphaine Chevallier, Tantely M. Razafimbelo, Lydie Chapuis-Lardy et Michel Brossard (dir.)

Carbone des sols en Afrique Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles

IRD Éditions

Chapitre 6. Évaluation du carbone des sols du Tchad

Limites et recommandations

Abdraman A. Adoum et Michel Brossard

DOI : 10.4000/books.irdeditions.34922

Éditeur : IRD Éditions, FAO

Lieu d'édition : Rome, Marseille

Année d'édition : 2020

Date de mise en ligne : 16 décembre 2020

Collection : Synthèses

ISBN électronique : 9782709928373



<http://books.openedition.org>

Édition imprimée

Date de publication : 1 septembre 2020

Référence électronique

A. ADOUM, Abdraman ; BROSSARD, Michel. *Chapitre 6. Évaluation du carbone des sols du Tchad : Limites et recommandations* In : *Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles* [en ligne]. Rome, Marseille : IRD Éditions, 2020 (généré le 18 décembre 2020). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/irdeditions/34922>>. ISBN : 9782709928373. DOI : <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.34922>.

Évaluation du carbone des sols du Tchad

Limites et recommandations

Abdraman A. ADOUM, Michel BROSSARD

Introduction

Est-il nécessaire d'argumenter une fois de plus le besoin de connaître les stocks de carbone organique des sols ? Au stade actuel d'acquisition des connaissances, ces données manquent pour les sols du Tchad, un pays très étendu au sein de trois grands biomes bioclimatiques. Dans l'Atlas des sols d'Afrique (JONES *et al.*, 2013) les évaluations des stocks de carbone au Tchad se situent dans une fourchette entre moins de 10 Mg C.ha⁻¹ et 90 Mg C.ha⁻¹ pour la couche 0-1 m. Les sols ayant les stocks les plus élevés pourraient correspondre aux sols hydromorphes alluvionnaires, voire les Vertisols. Dans un travail antérieur, nous avons en effet montré la particularité des sols du pourtour du lac Tchad, qui sont occupés par des cultures irriguées après poldérisation et par des cultures de décrue (ADOUM *et al.*, 2017) et qui contiennent des niveaux importants de stocks de carbone organique.

À l'échelle locale, le maintien des stocks de carbone organique du sol (COS) à l'équilibre ou son augmentation vers un niveau optimal peut contribuer à la réalisation des objectifs de développement durable (ODD). Ces objectifs peuvent être atteints en soutenant le potentiel des sols en termes de services écosystémiques, afin de (1) soutenir, maintenir ou améliorer la productivité des sols (nécessaire pour atteindre les ODD 2 « Faim zéro » et 3 « Bonne santé et bien-être »), (2) stocker et filtrer les eaux (ODD 3 et ODD 6 « Eau potable et assainissement »), (3) préserver la biodiversité (ODD 15 « Vie terrestre ») et (4) accroître la résilience des écosystèmes face au changement climatique (ODD 13 « Actions pour le climat »).

En zone tropicale sèche, notamment au Tchad, la mise en culture avec des pratiques inadaptées dégrade les terres et entraîne une diminution rapide de la teneur en COS et l'apparition de carences en éléments minéraux divers. Le rendement des cultures baisse et les terres sont parfois abandonnées (PIERI, 1989).

Afin d'évaluer les données existantes sur le carbone des sols tchadiens, ce chapitre se base sur un inventaire de 105 profils de sols et de 502 horizons analysés entre 1954 et 2013. D'ores et déjà, nous soulignons l'absence de données concernant les masses volumiques (ou densité apparente), qui auraient permis de calculer des stocks de COS à partir des anciennes données. Aussi, nous nous appuyons sur les équations de pédotransfert pour les calculer.

Répartition des sols dominants du Tchad

La République du Tchad se situe entre les latitudes 8° et 22° Nord. Avec une superficie de 1 284 000 km², le Tchad est bordé à l'est par des massifs granitiques du Ouaddaï, au sud par les contreforts de l'Adamaoua, au nord par les massifs volcaniques ou gréseux du Tibesti et de l'Ennedi. Ce vaste territoire est un bassin endoréique caractérisé par le bassin du Logone et du Chari. Il est recouvert de sables et d'argiles tertiaires fluviaux et lacustres, une grande partie d'âge quaternaire, et où se distinguent des séries fluviales ou lacustres déposées au cours d'épisodes pluviaux antérieurs consécutifs à des phases d'extension du lac Tchad (DE SAINT-AMAND, 1969 ; SCHUSTER *et al.*, 2006 ; BOUCHETTE *et al.*, 2010).

De par sa situation géographique, le Tchad offre toute une diversité climatique, avec trois grandes zones bioclimatiques du nord au sud et une répartition très variée des ressources naturelles en eau, en sols et en biomasse (THOMASSEY, 1991 ; AUBREVILLE, 1949) :

- la zone saharienne (aride, BWh selon la classification de Köppen-Geiger, PEEL *et al.*, 2007), avec une pluviométrie inférieure à 300 mm.an⁻¹ atteignant parfois 26,7 mm.an⁻¹ à la frange du désert au nord : les précipitations y sont réparties sur deux mois et la température moyenne annuelle est de 28,3°C. Sur près de 47 % de la superficie du pays, cette zone est caractérisée par une steppe alternant avec des espaces nus parsemés d'oasis ;

- la zone sahélienne (semi-aride, BSh selon Köppen-Geiger), avec une pluviométrie comprise entre 300 et 600 mm.an⁻¹, se situe au centre du pays. Sur environ 28 % de la superficie du Tchad, cette zone est caractérisée par des steppes arbustives et/ou arborées à épineux (*Acacias*) accompagnées d'espèces herbacées annuelles (*Andropogonées*) ;

– la zone soudanienne (tropicale humide à saisons contrastées, Aw selon Köppen-Geiger), avec une pluviométrie supérieure à 600 mm.an⁻¹, atteignant parfois 1 200 mm.an⁻¹ vers la pointe sud, couvre 25 % de la superficie du pays. Elle est recouverte de savanes arborées à Combrétacées et de savanes boisées ainsi que des forêts claires « riches » en Fabacées.

Les sols sont très variés (PIAS, 1962, 1964, 1970ab, 1972 ; PIAS et SABATIER, 1964) selon la classification française de la Commission de pédologie et de cartographie des sols (CPCS, 1967). Ils ont été associés avec ceux de la base de référence mondiale pour les ressources en sols (BRM) (WRB, 2014), un système de classification basé essentiellement sur la morphologie des profils et sur des analyses de laboratoire. Le tableau 1 résume les unités de sols dominants et leur correspondance avec ceux de la BRM, ainsi que leur distribution spatiale suivant le domaine bioclimatique.

Tableau 1

Unités de sols : correspondance entre les classifications CPCS et BRM et répartition spatiale.

Unités de sol et classification		Nombre de profils	Nombre d'horizons	Distribution des profils (%)	Répartition spatiale
CPCS (1967)	WRB (2014)				
Sols minéraux bruts	Arenosols	3	13	2,9	Dans le nord au-delà de la latitude 16° Nord.
Sols peu évolués	Fluvisols	13	56	12,4	Dans le nord en deçà de la latitude 16° Nord et dans les massifs Central et du Ouaddaï.
Sols ferrugineux tropicaux profonds	Lixisols ferriques	9	44	8,6	Dans le sud et dans le massif central entre les latitudes 13° et 14° Nord.
Sols ferrugineux tropicaux à cuirasse	Leptosols eutriques	5	23	4,8	Sur le pourtour du massif Central et sur les contreforts du massif du Ouaddaï.
Sols rouges ferrallitiques	Ferralsols rhodiques	17	38	16,2	Principalement au sud au 10° de latitude Nord
Vertisols	Vertisols	14	71	13,3	Principalement entre les latitudes 9° et 13° Nord.
Sols hydromorphes	Gleysols	30	199	28,6	Très répandus dans les grandes plaines d'inondation du Logone et du Chari.
Sols halomorphes	Solonchaks	14	58	13,3	Sur la bordure des lacs Tchad et Fitri dans les ouadis et oasis.
Total		105	502	100	

Méthodologie de calcul et d'analyse

Estimation de la densité apparente

Pour les horizons où les données de la densité apparente (ρ_b) sont indisponibles, nous nous sommes basés sur des méthodes de régression multilinéaire et nous avons estimé la densité apparente des sols à l'aide des équations de pédotransfert suivantes :

$$\rho_b \left(g \text{ cm}^{-3} \right) = 0,80806 + (0,823844 \times \text{EXP}(-0,27993 \times \text{COS}\%)) \quad (1)$$

avec $R^2 = 0,62$ pour $n = 333$, pour les sols cultivés (HOLLIS *et al.*, 2012).

$$\rho_b \left(g \text{ cm}^{-3} \right) = 0,69794 + (0,750636 \times \text{EXP}(-0,230355 \times \text{COS}\%)) + (0,0008687 \times \text{Sables}\%) - (0,0005164 \times \text{Argiles}\%) \quad (2)$$

avec $R^2 = 0,63$ et $n = 925$ pour les horizons minéraux des sols minéraux bruts (Arenosols) (HOLLIS *et al.*, 2012).

Détermination de la teneur en carbone

Les estimations ont été effectuées par la méthode de Walkley et Black (WALKLEY et BLACK, 1934), sauf pour les données récentes sur les Gleysols (CHN Fisons EA 1108, ISO 10694 1995 ; ISO 13878 1998).

Estimation des stocks de COS

Les stocks de COS (exprimés en mégagrammes par hectare, $\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$) ont été estimés par couche de sol selon l'équation suivante (BATJES, 1996) :

$$\text{COS} = \sum_{i=1}^k \text{COS}_i = \sum_{i=1}^k \rho_i \times C_i \times D_i \times 0,1 \quad (3)$$

Où k est le nombre d'horizons, COS_i le stock de carbone organique de la couche i ($\text{Mg C} \cdot \text{ha}^{-1}$), ρ_i la densité apparente ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), C_i la teneur en carbone organique ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) et D_i est l'épaisseur de la couche i de sol et 0,1 est une constante pour ajuster les unités. Les valeurs de stocks de COS sont ici estimées pour la terre fine car nous ne disposons pas de données permettant de connaître ou d'estimer avec précision les teneurs en éléments grossiers (fractions supérieures à 2 mm) ou de les estimer avec précision.

Les sols dominants et les données « carbone »

Distribution spatiale des teneurs et des stocks de COS

Le tableau 2 présente les mesures de teneurs en carbone et le tableau 3 les stocks de carbone mesurés et ceux estimés à partir des équations de pédotransfert.

Tableau 2
Teneurs en carbone organique des grandes unités de sols du Tchad.

Unités des sols	n	Teneurs en carbone (g.kg ⁻¹)			CV (%)	Test de Tuckey*
		Moy.	Min.	Max.		
Sols minéraux bruts (Arenosols)	13	1,3 ± 0,5	0,6	1,8	40	ab
Sols peu évolués (Fluvisols)	56	2,4 ± 1,4	0,6	7,3	59	a
Sols ferrugineux tropicaux profonds (Lixisols ferriques)	44	4,1 ± 2,5	1,4	12,1	62	ab
Sols ferrugineux tropicaux à cuirasse (Leptosols eutriques)	23	4,5 ± 2,8	0,8	8,5	61	ab
Sols rouges ferrallitiques (Ferralsols rhodiques)	83	10,6 ± 7,7	0,6	24,3	72	b
Vertisols	71	8,5 ± 6,6	1,7	22,6	78	b
Sols hydromorphes (Gleysols)	199	19,1 ± 15,7	0,9	56	82	c
Sols halomorphes (Solonchaks)	58	6,6 ± 6,0	1,3	37	91	ab

Valeurs moyennes (moy.), minimales (min.), maximales (max.), nombre d'échantillons (n) et coefficients de variation (CV) de la couche 0-30 cm.

* Les teneurs moyennes en carbone appartenant à un même groupe (a, b ou c) ne sont pas significativement différentes. Les statistiques effectuées sont une analyse de variance et un test de comparaisons multiples de Tukey, dit « test HSD » (P < 0,05).

Sols minéraux bruts (Arenosols)

Ce sont des sols présentant un profil AC, où l'horizon A est directement sur l'horizon C d'altération de la roche mère. Ils se développent dans les parties les plus arides du Tchad. La texture est très sableuse et contient peu d'argiles, de 5 à 10 % dans l'horizon de surface. Leurs pH sont généralement alcalins (7,5 à 8, et tendent à baisser légèrement avec la profondeur. Ils ont une très faible teneur en carbone organique, de 0,6 à 1,8 g.kg⁻¹ de sol, avec une valeur moyenne de 1,3 ± 0,5 g.kg⁻¹ de sol. Ils présentent une variabilité très forte (coefficient de variation, de 40 %) (tabl. 2). Cette forte variabilité peut s'expliquer, en partie, par le nombre insuffisant de prélèvements pour calculer une valeur moyenne de la teneur en COS pour l'ensemble des échantillons étudiés. Les stocks moyens mesurés et estimés sont respectivement de 2,47 Mg C.ha⁻¹, et 1,63 Mg C.ha⁻¹. Au vu de la large étendue de ces sols, les mesures et les estimations restent

Tableau 3
Densités apparentes et stocks de carbone (mesurés et estimés) des principaux sols du Tchad (couche 0-30 cm).

Unités de sols	Valeurs mesurées						Valeurs estimées							
	Densités apparentes (g.cm ⁻³)			Stocks de carbone (Mg C.ha ⁻¹)			Densités apparentes (g.cm ⁻³)			Stocks (Mg C.ha ⁻¹)				
	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.		
Sols minéraux bruts (Arenosols)	1,50	1,40	1,60	2,47	1,86	2,88	4	1,49	1,49	1,52	1,63	2,64	9	
Sols peu évolués (Fluvisols)	1,67	1,32	1,97	4,90	1,79	12,34	13	1,58	1,48	1,62	3,42	0,97	10,80	43
Sols ferrugineux tropicaux profonds (Lixisols ferriques)	1,40	1,00	1,70	4,75	2,10	8,35	8	1,54	1,40	1,60	6,43	2,24	16,88	36
Sols ferrugineux tropicaux à cuirasse (Leptosols eutriques)	1,23	0,93	1,44	4,32	1,12	10,08	7	1,53	1,46	1,61	7,50	1,29	12,39	16
Sols rouges ferrallitiques (Ferralsols rhodiques)	1,23	0,89	1,70	14,08	0,75	28,08	13	1,44	1,23	1,62	13,55	0,97	29,78	17
Vertisols	1,31	1,15	1,50	8,88	2,13	29,38	10	1,46	1,25	1,59	12,08	2,71	28,15	61
Sols hydromorphes (Gleysols)	0,89	0,61	1,13	25,88	6,31	54,24	70	1,42	0,98	1,61	16,06	1,45	54,87	129
Sols halomorphes (Solonchaks)	1,67	1,48	1,96	21,73	4,65	72,52	8	1,50	1,10	1,60	9,57	2,08	40,72	50

Valeurs moyennes (moy.), minimales (min.), maximales (max.) et nombre d'échantillons (n) de la couche 0-30 cm.

imprécises. Au vu des utilisations variées de ce type de sol, parcours pâturés et cultures dans les oasis, il est nécessaire de mieux définir cette région pédobio-climatique située au nord de la latitude 16° Nord.

Sols peu évolués (Fluvisols)

Ces sols jeunes présentent un profil AC peu différencié dans lequel l'horizon humifère est « posé » sur le matériau originel. Très sableux, ils se sont formés sur des séries sédimentaires anciennes ou récentes (PIAS, 1962, 1970b). Ils sont caractérisés par une minéralisation intense de la matière organique et par la formation d'acides humiques relativement stables qui vont conférer au profil, malgré de faibles teneurs en matières organiques, une coloration foncée dans la gamme des bruns (DUPUIS et CHEVERRY, 1973).

Leur pH est compris entre 6 et 8 et leur rapport C/N entre 8 et 12. La teneur en COS est comprise entre 0,6 et 7,3 g C.kg⁻¹, avec une valeur moyenne de $2,4 \pm 1,4$ g C.kg⁻¹ et un coefficient de variation élevé, de 59 % (tabl. 2), du fait probablement d'une grande variabilité des textures, ou des usages de ces sols ou encore du faible nombre d'échantillons étudiés. Le stock moyen mesuré sur seulement 13 échantillons est de 4,9 Mg C.ha⁻¹. Si on estime les densités apparentes manquantes à partir d'équations de pédotransfert, la population des valeurs de stocks augmente à 43 échantillons, mais la moyenne des stocks des Fluvisols est plus faible : 3,4 Mg C.ha⁻¹.

Ces sols ont une valeur agricole modeste bien que les facteurs hydriques puissent être favorables pour des cultures de décrue. Des cultures vivrières diverses, comme le sorgho et l'arachide, y sont produites. Une grande partie de ces sols sert de pâturages aux troupeaux des populations sédentaires ou nomades (transhumance en saison sèche).

Sols ferrugineux tropicaux profonds (Lixisols ferriques)

Ils ont un profil de type A(B)C avec un horizon B d'accumulation plus moins marqué. Ils résultent d'une faible altération des minéraux silicatés par une hydrolyse modérée et d'une faible évacuation des produits de l'hydrolyse. L'empreinte de la pédogenèse est marquée dans ces sols par une migration de l'argile et du fer par lessivage vertical ou oblique (PIAS *et al.*, 1954). Leur texture est sablo-argileuse leur pH varie de 5 à 7 et leurs rapports C/N entre 11 et 12 (BILLON *et al.*, 1974). On y trouve des cultures de sorgho et de coton.

Les teneurs en carbone de ces sols sont surtout comprises entre 1,4 et 12,1 g.kg⁻¹ (tabl. 2) avec une valeur moyenne de $4,1 \pm 2,5$ g.kg⁻¹. Cette forte variabilité de la teneur en carbone se traduit par un coefficient de variation élevé (62 %). Les stocks moyens mesurés et estimés sont respectivement de 4,45 Mg C.ha⁻¹ et de 6,43 Mg C.ha⁻¹ (n=36). Toutefois, en l'absence de données fiables sur la fraction grossière des sols, ces résultats doivent être pris avec une grande prudence.

Sols ferrugineux tropicaux à cuirasse (*Leptosols eutriques*)

Le profil est de type ABC. L'horizon B cuirassé contient des concrétions ferrugineuses qui se constituent en masse pour donner un horizon très dur, imperméable, avec 30 à 35 % de kaolinite. Les cuirasses sont d'épaisseur variable, de 2 à 6 m, souvent vacuolaires et d'apparence superposées, de couleur rouge et brun. Ces sols s'observent par intermittence vers le nord, sur les contreforts du massif du Ouaddaï. Ils se rencontrent également en différents endroits dans le nord de ce même massif (PIAS et POISOT, 1967). Ils ont une teneur en carbone variant de 0,8 à 8,5 g.kg⁻¹ (tabl. 2) avec une valeur moyenne de $4,5 \pm 2,8$ g.kg⁻¹. Cette teneur présente un fort coefficient de variation (61 %) presque autant que les sols ferrugineux tropicaux profonds. De par leurs faibles teneurs en carbone, ces sols ont une valeur agricole modeste. Ainsi, une partie du massif Central est devenue la réserve de faune de Zakouma. Les stocks moyens mesuré et estimés sont respectivement de 4,32 Mg C.ha⁻¹ et de 7,50 Mg C.ha⁻¹. Comme précédemment, la principale limite de ces résultats est liée à la méconnaissance de la fraction gravillonnaire grossière.

Sols rouges ferrallitiques (*Ferralsols rhodiques*)

Le profil est de type ABC. L'horizon superficiel est sableux, sablo-argileux. L'horizon B est relativement homogène sur une grande épaisseur, avec la variabilité suivante : les teneurs en argiles variant de 25 à 55 %, celles des limons de 5 à 24 %, celles des sables fins de 10 à 25 % et des sables grossiers de 10 à 40 %. Ces sols sont issus d'une altération intense et profonde des minéraux silicatés à l'exception du quartz moins facilement altérable. Cette altération emporte la silice et les bases par lixiviation et libère des hydroxydes de fer ou d'aluminium qui demeurent en place dans le profil formé. Les hydroxydes de fer (hématite, goethite) et le fer amorphe viennent se fixer à la surface des argiles conférant aux sols la coloration rouge que l'on observe sur une épaisseur de 7-10 m et parfois plus (PIAS, 1954).

Les pH varient entre 5 et 7, avec des rapports C/N allant de 11 à 19. Les teneurs en carbone organique présentent une variabilité très importante (coefficient de variation de 72 %, tabl. 2), entre 0,6 et 24,3 g.kg⁻¹ avec une valeur moyenne de $10,6 \pm 7$ g.kg⁻¹. Les stocks moyens mesurés et estimés sont respectivement de 14,08 Mg C.ha⁻¹ et 13,55 Mg C.ha⁻¹. Le faible nombre de sites inventoriés limite la qualité de ces résultats et nous pensons que ces données sont largement sous estimées pour la couche 0-30 cm, ou tout du moins donnent une indication des sites dans lesquels les stocks de carbone sont particulièrement faibles. Ces sols portent des cultures variées – sorgho, petit mil, arachide, manioc et coton – aux rendements variables selon les années.

Vertisols

Ces sols noirs présentent des profils A(B)C ou A(B)gC plus ou moins homogènes caractérisés par un mauvais drainage interne (noté g). Ils se sont formés dans

un matériau peu perméable constitué par des argiles de type montmorillonites saturées en Ca^{2+} et Mg^{2+} .

Les teneurs en carbone organique sont comprises entre 1,7 et 22,6 g.kg⁻¹ avec une valeur moyenne de 8,5±6,6 g.kg⁻¹. Leur coefficient de variation est très élevé (78 %, tabl. 2). Les stocks moyens calculés et estimés sont respectivement de 8,88 Mg C.ha⁻¹ et 12,08 Mg C.ha⁻¹. Ces stocks paraissent faibles dans des sols contenant des argiles montmorillonites qui sont réputées pour stabiliser la matière organique des sols. Néanmoins, ces sols ont une forte valeur agronomique, étant riches et très fertiles, avec des rendements de sorgho et coton plus élevés comparativement aux autres types de sols du pays.

Sols hydromorphes (Gleysols)

Ces sols ont un profil A (B)g C (« g » signifiant « engorgement temporaire avec alternance de périodes engorgées et non engorgées »). Leur caractère hydromorphe résulte d'un excès d'eau lié à des engorgements plus ou moins profonds ou à des inondations. Ils sont caractérisés par des horizons de gley ou de pseudo-gley. Dans les horizons de gley, l'engorgement est prolongé, Le fer est donc davantage dans des conditions de réduction que d'oxydation. Le fer réduit à l'état ferreux peut s'accumuler (PIAS et GUICHARD, 1960) donnant une couleur grisâtre, verdâtre ou bleutée. Les horizons de pseudo-gley moins engorgés, présentent des taches d'oxydation du fer colorées en rouge, ocre-rouille. Si le fer est éliminé, l'horizon s'appauvrit et est alors de couleur blanc, beige.

Les pH varient de 5 à 7 et les rapports C/N sont très variables. Les teneurs en COS sont comprises entre 0,9 et 56 g.kg⁻¹ avec une valeur moyenne de 19,1±15,7 g.kg⁻¹ et une variabilité très importante (coefficient de variation de 82 %, tabl. 2). La distribution spatiale de ces sols sur de larges surfaces et une forte disparité de leur usage expliquent cette forte variabilité. Ils peuvent faire notamment l'objet de pratiques agricoles intensives et présenter de très faibles stocks de carbone.

Une étude spécifique sur les polders issus d'alluvions actuelles et subactuelles du lac Tchad, a mesuré les stocks de carbone de 33 profils de sols jusqu'à 1 m de profondeur. Des stocks supérieurs à 180 Mg C.ha⁻¹ ont été rapportés. Le carbone inorganique y est assez peu représenté. Il semble que les polders cultivés conservent en partie les stocks de carbone hérités des marécages préexistants (ADOUM *et al.*, 2017).

Sols halomorphes (Solonchaks)

Le profil est de type AC ou A(B)C. Les teneurs en argile sont très variables, de 20 à 40 %, ainsi que celles en limon, de 10 à 35 %. La structure de ces sols conduit souvent à une mauvaise perméabilité. Les teneurs en CaCO_3 peuvent être élevées jusqu'à 65 %, principalement en surface. Les pH sont généralement élevés, de 8 à 10, avec des rapports C/N compris entre 9 et 14,

mais le plus souvent entre 12 et 3 (PIAS, 1970a). Les teneurs en COS sont variables, entre 1,3 et 37 g.kg⁻¹, avec une valeur moyenne de 6,6±6,0 g.kg⁻¹, avec un coefficient de variation très élevé 91 % (tabl. 2). Cette variabilité est attribuable, comme pour les sols hydromorphes, à leur distribution dans des conditions relativement variées, dont des conditions d'aridité plus marquées au nord. Les stocks de carbone moyens mesurés et estimés sont respectivement de 21,73 Mg C.ha⁻¹ et de 9,57 Mg C.ha⁻¹. La faible valeur du stock de COS estimé suggère que les équations de pédotransfert pour estimer les densités apparentes, puis calculer les stocks, soient perfectibles. La valeur du stock moyen mesuré étant plus cohérente avec la description de ces sols (couleur, texture).

On note une hétérogénéité bien apparente des teneurs en COS avec des variabilités très fortes (coefficient de variation de 50 à 91 %, tabl. 2) pour les unités des sols étudiés. Les futurs plans d'échantillonnage pour l'étude des stocks et leurs suivis dans le temps devront prendre en compte cette forte variabilité des stocks de carbone. Ils devront prendre en compte à la fois les contextes pédoclimatiques, les formations végétales et les pratiques agricoles. Du nord au sud, les formations végétales rencontrées sont (1) la steppe et la savane arbustive – avec très peu de biomasse végétale et donc une productivité des sols très faible – et (2) la savane arborée au centre et dans la zone soudanienne qui bénéficie d'une pluviométrie relativement élevée, et génère une productivité des sols plus importante.

Déterminants de la variabilité spatiale des teneurs en carbone organique

Unités des sols ou types de sol

La distribution spatiale des types de sol est présentée dans le tableau 1. Les sols sont organisés sous forme de grandes unités associant les types suivants : Arenosols, Fluvisols, Lixisols ferriques, Leptosols eutriques, Ferralsols rhodiques, Solonchaks et Gleysols. Ces deux derniers types présentent une large distribution aussi bien au nord qu'au sud. Malgré cette organisation générale, la distribution des types de sols peut être également variable localement. Cette variabilité se décline alors par une distribution hétérogène des teneurs en carbone au sein des grandes unités de sols.

Topographie

Le relief pourrait être un facteur déterminant de la distribution spatiale des teneurs en carbone à l'échelle de la parcelle. On note une répartition spatiale des teneurs en carbone hétérogène selon la topographie et la végétation qui y est associée. Dans les sols des bas-fonds (Gleysols), on observe des teneurs élevées de COS par rapport à ceux des glaciés (Fluvisols) (tabl. 2). Cependant, cette distribution peut être affectée d'une variabilité sur de courtes distances liée à l'intensification des pratiques agricoles.

Limites de l'étude

La principale limite de cette étude est que la littérature concernant le COS au Tchad est très peu fournie, peu de données de teneur en COS et encore moins de données de densités apparentes sur certaines unités des sols. À notre connaissance, cette étude est la première évaluation des données de COS sur l'ensemble du territoire du Tchad. Elle n'est pourtant que préliminaire, car nous ne pouvons pas encore tirer de conclusions solides sur les stocks de COS des différents types des sols selon leurs usages.

Recommandations

Afin de fournir des appuis techniques, voire politiques, de la gestion des stocks de carbone des sols, il est nécessaire d'acquérir plus de données, d'améliorer la précision des estimations mais aussi la disponibilité de ces données. Au Tchad, comme dans de nombreux pays d'Afrique, il est nécessaire de mettre en place des réseaux d'observatoires sur le long terme et des sites d'expérimentation afin de suivre l'état des sols (teneurs et stocks de carbone) et réaliser des bilans des émissions de gaz à effet de serre des sols agricoles. De plus, depuis les années 1970, le Tchad dispose d'une carte des sols au 1/1 000 000 couvrant l'ensemble du territoire national. Cette carte pourrait servir de base à la réalisation d'une carte du carbone des sols. Elle demeure cependant à être précisée à de plus grandes échelles. Or, des données sont nécessaires à plusieurs niveaux : au niveau national pour orienter les politiques et les stratégies, au niveau sous-territorial pour la planification et au niveau parcellaire pour la gestion des terres.

Conclusion

Ce travail a la particularité de compiler les quelques données existantes sur le carbone des sols du Tchad. Les estimations des teneurs et stocks de carbone sont entachées de grandes incertitudes. Ces variabilités s'expliquent principalement par un faible taux d'échantillonnage, les différents modes d'usage et de gestion des espaces agricoles et non agricoles, les choix des aires de protection, les différents taux de production de biomasse végétale sous stress hydrique permanent, qui alimentent les stocks de carbone. Ces facteurs déterminants des stocks de carbone seront à prendre en compte dans les futures études.

Bibliographie

ADOUM A. A., MOULIN P., BROSSARD M., 2017
Pioneering assessment of carbon stocks in polder soils developed in inter-dune landscapes in a semiarid climate, Lake Chad. *Comptes Rendus Géoscience*, 349 (1) : 22-31.

AUBRÉVILLE A., 1949
Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Paris, Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, 351 p.

BATJES N. H. 1996
Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science* 47:151-163.

BILLON B., GUISCAFRÉ J., HERBAUD J., OBERLIN C., 1974
Le bassin du fleuve Chari. Paris, ORSTOM, 450 p.

BOUCHETTE F., SCHUSTER M., GHIEFFE J.-F., DENAMIEL C., ROQUIN C., MOUSSA A., MARSALEIX P., DURINGER P., 2010
Hydrodynamics in Holocene Lake Mega-Chad. *Quaternary Research*, 73 (2) : 226-236.

CPCS, 1967
Classification des sols. Grignon, ENSA, 96 p.

DE SAINT-AMAND R. D., 1969
Le Continental terminal et son influence sur la formation des sols au Niger. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 7 (4) : 561-584.

DUPUIS T., CHEVERRY C., 1973
Étude de « l'humine » de vases lacustres et de sols des polders de bordure du lac Tchad.» *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 11 (3-4) : 215-225.

HOLLIS, J., HANNAM J., BELLAMY P., 2012
Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European Journal of Soil Science*, 63 (1) : 96-109.

JONES A., BREUNING-MADSEN H., BROSSARD M., DAMPHA A., DECKERS J., DEWITTE O., GALLALI T., HALLETT S., JONES R., KILASARA M., LE ROUX P., MICHELI E., MONTANARELLA L., SPAARGAREN O., THIOMBIANO L., VAN RANST E., YEMEFACK M., ZOUGMORÉ R. (éd.), 2013
Soil Atlas of Africa. Luxembourg, European Commission, Publications Office of the European Union, 176 p.

PEEL M. C., FINLAYSON B. L., MCMAHON T. A., 2007
Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11 (5) : 1633-1644.

PIAS J., 1954
« Bassin du Moyen Logone : campagne de 1953 ». In ORSTOM (éd.) : *Étude pédologique du bassin alluvionnaire du Logone Chari*, Paris, ORSTOM : 115-162.

PIAS J., 1962
Les sols du Moyen et Bas Logone, du Bas Chari, des régions riveraines du lac Tchad et du Bahr el Ghazal. Paris, ORSTOM, 484 p.

PIAS J., 1964
« Les sols du Tchad. » Présentation au 8^e Congrès international des sciences du sol, Bucarest, Roumanie.

PIAS J., 1970A
Carte pédologique du Tchad à 1/1 000 000. Paris, ORSTOM, 197 p. (Notice explicative 141 p.)

PIAS J., 1970B
Les formations sédimentaires tertiaires et quaternaires de la cuvette tchadienne et les sols qui en dérivent. *Mémoires ORSTOM*, 43. Paris, ORSTOM, 411 p.

PIAS J., 1972
« Pédologie ». In Cabot J. et Bouquet C. (éd.) : *Atlas pratique du Tchad*, Fort-Lamy, Institut national tchadien pour les sciences humaines – Institut géographique national : 20-21.

PIAS J., ERHART H., LENEUF N., 1954
Étude pédologique du bassin alluvionnaire du Logone Chari. Paris, ORSTOM, 234 p.

PIAS J., GUICHARD E., 1960
Étude pédologique des rives du lac Tchad de Djimtilo à Bol et du sillon du Bahr el Ghazal de Massakory à Moussoro. Fort-Lamy, ORSTOM, 163 p. multigr. p.

PIAS J., POISOT P., 1967
Cartes pédologiques de reconnaissance au 1/200 000 : feuilles d'Abou Dëïa – Mangalmé Paris, ORSTOM, 121 p. (Notice explicative : 128 p.).

PIAS J., SABATIER J., 1964

Étude des variations des taux de matière organique, d'azote et de la salinité dans les polders du lac Tchad. Fort-Lamy, ORSTOM, 144 p.

PIERI C., 1989

Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris, ministère de la Coopération et du Développement, CIRAD-IRAT, La Documentation française, 444 p.

SCHUSTER M., DURINGER P.,

GHIENNE J. F., VIGNAUD P., MACKAYE H. T., LIKIUS A., BRUNET M., 2006

The age of the Sahara Desert. *Science*, 311 (5762) : 821.

THOMASSEY J.-P., 1991

La situation des ressources naturelles du Tchad. *Bois & Forêts des Tropiques*, 228 : 49-62.

WALKLEY A. BLACK I. A. 1934

An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37 (1) : 29-38.

WRB, 2014

IUSS Working Group WRB. 2014. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports*, n° 106. FAO, Rome, 181 p.

